

Was müssen wir messen?

Modell: 1. Minimum \Rightarrow Radius

1. Maximum \Rightarrow Randursärfe

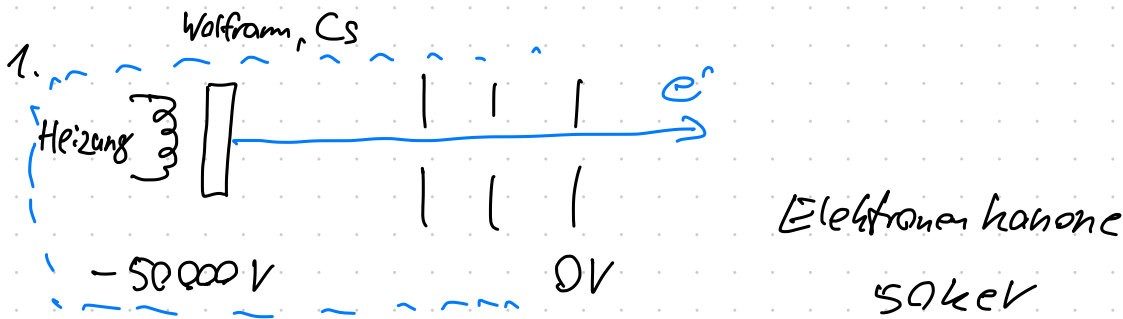
$F(q)$

$$q^2 = 0,13 \frac{\text{GeV}^2}{c^2} = 4 E E' \sin^2 \frac{\Theta}{2}$$

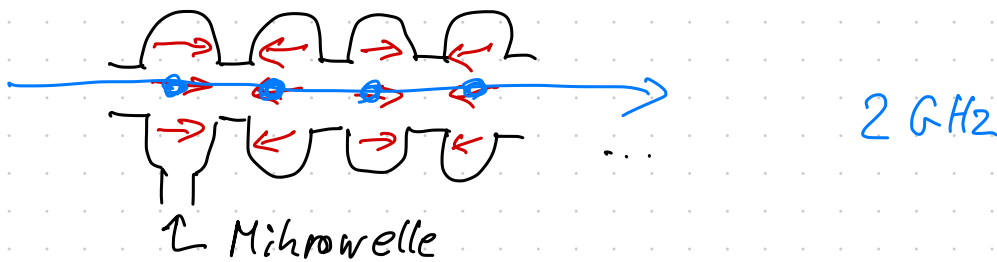
$$\Theta = 50^\circ \Rightarrow E \approx E' = 425 \text{ MeV}$$

Beschleuniger MAMI

Ziel: 20 nA Strom, 425 MeV Energie



2. Mikrowellenkavitäten



$$v_e = \frac{1}{2} \lambda f \Rightarrow \text{Beschleunigung}$$

"LINAC" Linear Accelerator

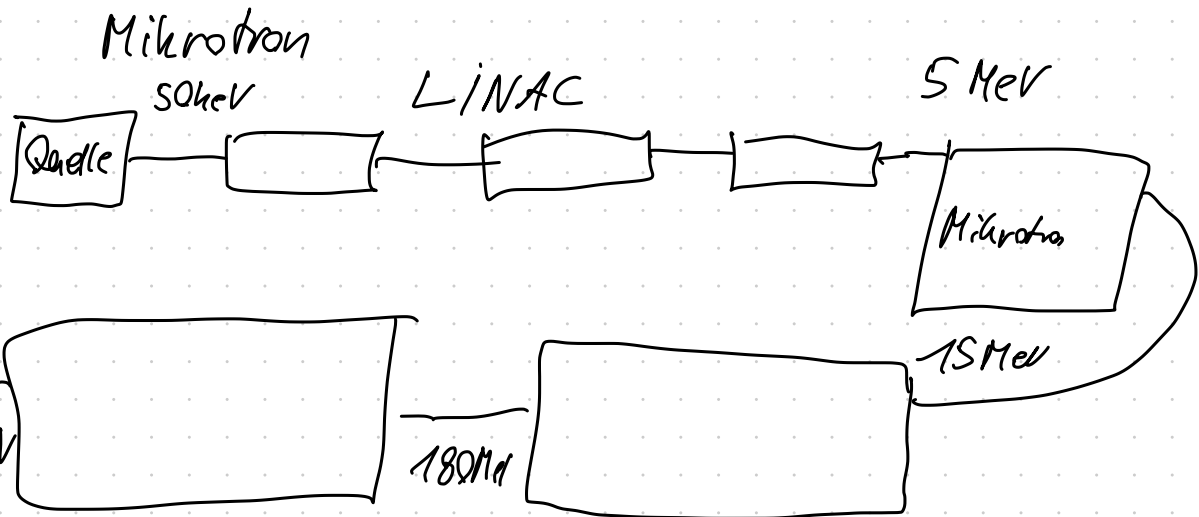
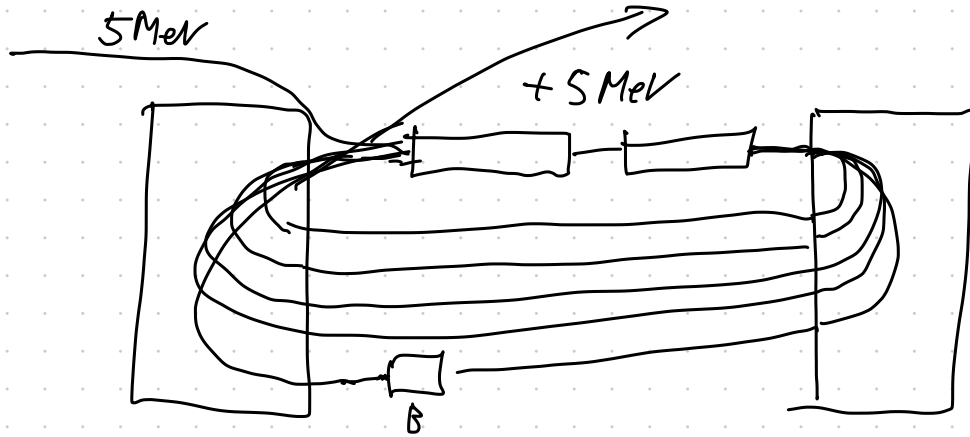
3. $m_e = 511 \frac{\text{keV}}{c^2}$

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{|\vec{p}|}{E} = \frac{\sqrt{E^2 - m^2}}{E} = \sqrt{1 - \frac{m^2}{E^2}} \approx 1 - \frac{m^2}{2E^2}$$

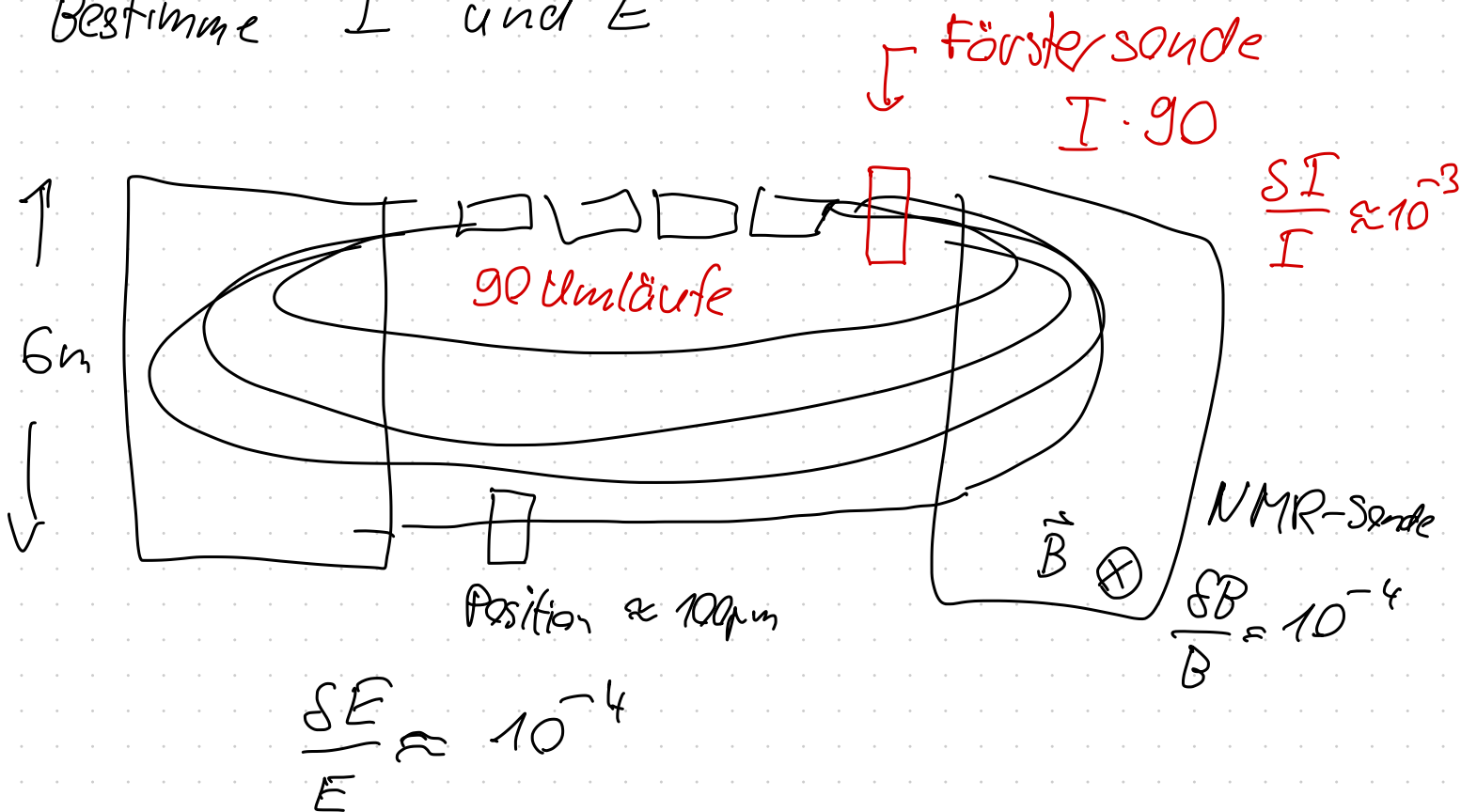
$$\sqrt{t} = 1 + \frac{1}{2}(t-1) - \dots$$

$E > 10 \text{ MeV} \Rightarrow \beta \approx 0,999$

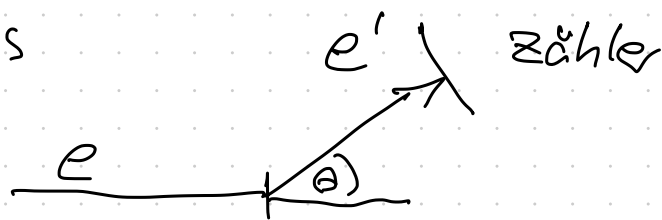
\Rightarrow Kavität bleibt gleich



Bestimme I und E



Teilchennachweis



⇒ keine Identifikation der Reaktion

⇒ Messung der fehlenden Masse

⇒ Messung des Impulses $\frac{\delta p}{p} < \underline{\underline{10^{-4}}}$

Impulsmessung ⇒ Magnetfeld

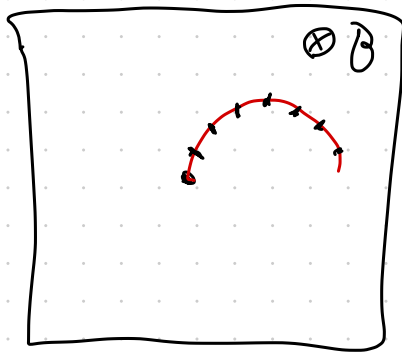
$$\text{Lorentz: } \vec{F} = e \frac{\vec{p}}{m} \times \vec{B}$$

konst. Feld $e \frac{p}{m} B = \frac{p^2}{mR}$ Zentrifugalkraft

$$\Rightarrow R = \frac{p}{eB}$$

Daumenregel $p = 1 \frac{\text{GeV}}{c}$, $B = 1 \text{T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$

$$\Rightarrow R = \frac{1 \frac{\text{GeV}}{c}}{e \cdot 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} = \frac{1}{0,299792458} \approx 3,33 \text{ m}$$



N : Spurpunkte
 δx : Einzelfehler $\approx 0,1 \text{ mm}$

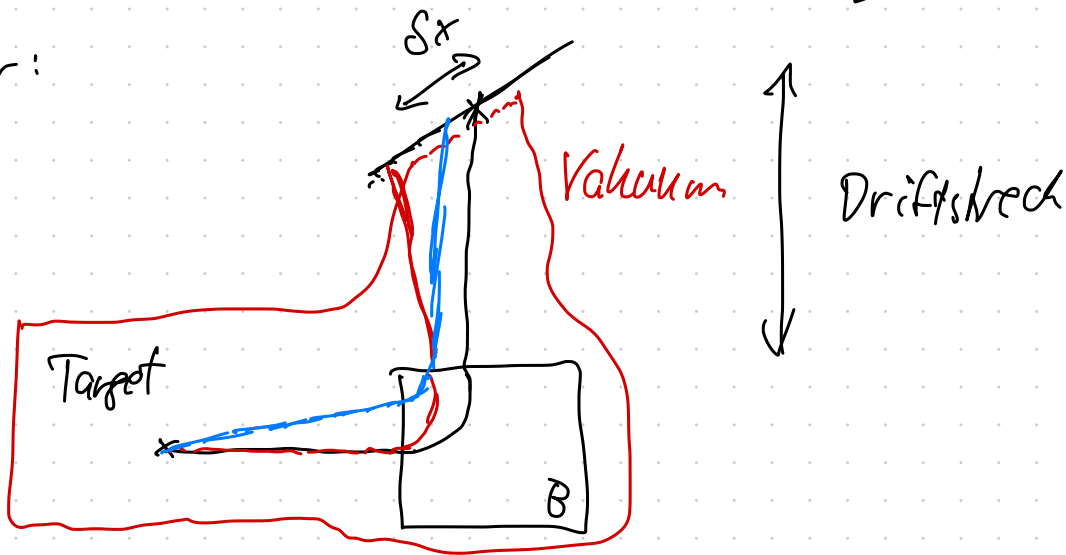
L : Spurlänge

$$k = \frac{1}{R}$$

$$\delta k = \frac{\delta x}{L^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

\Rightarrow Impulsmessung $\frac{\delta p}{p} \approx 1\%$
 zzgl. Vielfachstreuung } nicht gut genug!

Besser:

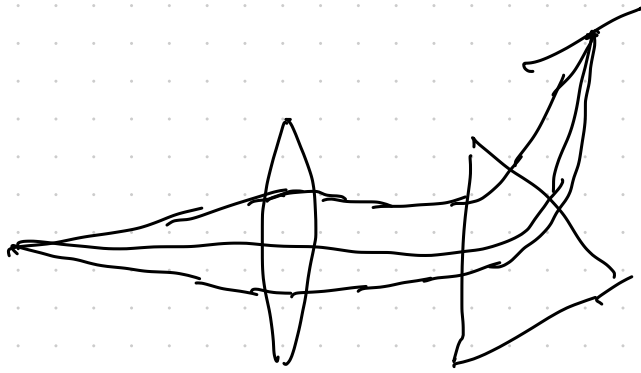


Dispersion $D = \frac{dx}{dp/p_{\text{ref}}} \quad [D] = \frac{\text{cm}}{\%}$

$$\frac{\delta p}{p} > \frac{\delta x}{D} \quad D > \frac{0,01 \text{ cm}}{0,01 \%} \approx 1 \frac{\text{cm}}{\%}$$

$$D \approx 5 \frac{\text{cm}}{\%}$$

Abe: Teilchenbahnen haben Winkel



fokussierende Optik

\Rightarrow gleicher Impuls } \rightarrow Ort
Winkelvariation }

$\rho \rightarrow$ Ort }
 $\Theta \rightarrow$ Winkel } Messung in der Fokalebene

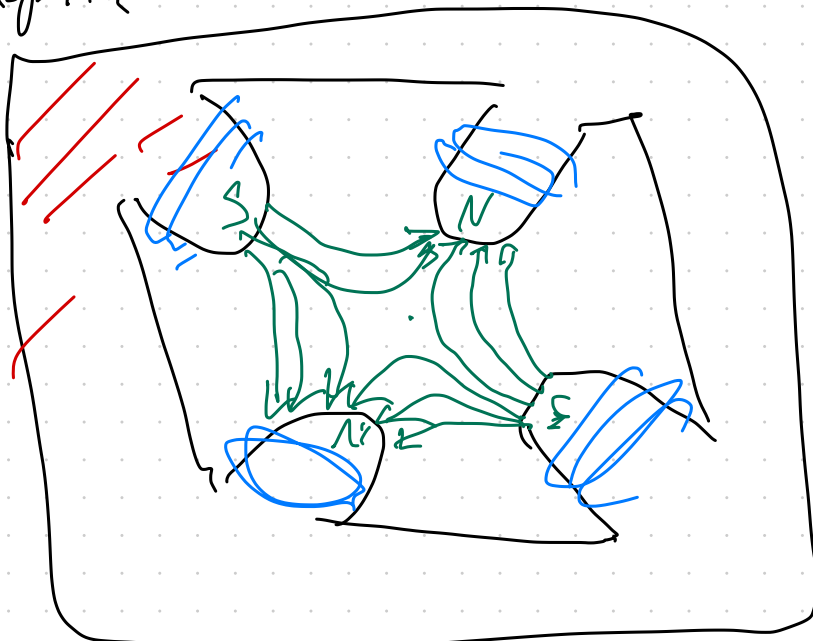
Strahlausdehnung δx_{Target}

Strahlfleck \rightarrow Fleck in der Fokalebene

\Rightarrow Vergrößerung $M = \frac{\delta x_{FE}}{\delta x_{\text{Target}}} \approx 0,5$ bei A1

Auflösungsvermögen $R = \frac{1}{M \cdot \delta x_{\text{Target}}}$

Magneto-optik:

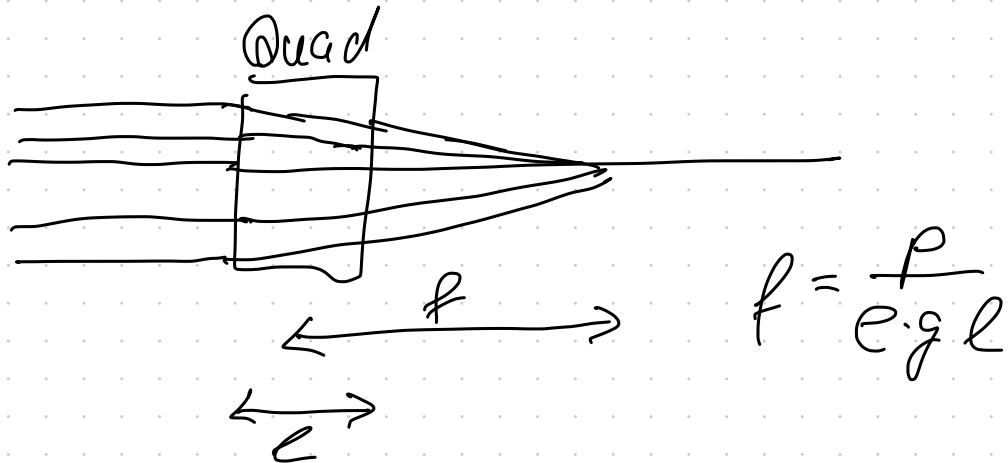


Feldgradient

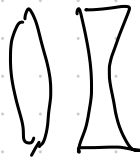
$$B_x = -g \cdot y$$

$$B_y = -g \cdot x$$

$$B_z = 0$$



netto fokussierend

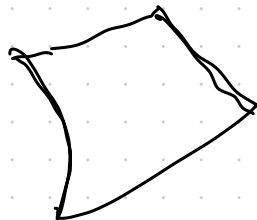


Höhere Ordnungen

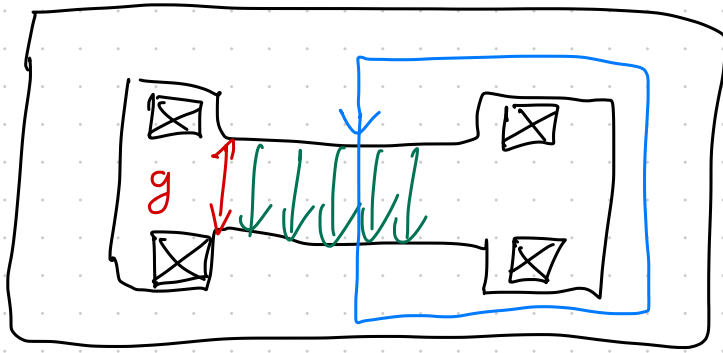
Sextupol \rightarrow chromatische Korrektur

Oktopol
:
:

Randfeld



V-Komponenten können durch Polstrichform erzielt werden



Maxwell-Gleichung $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}$

Stokes - Theorem:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint \vec{\nabla} \times \vec{H} \cdot d\vec{A} = \iint \vec{j} \cdot d\vec{A} = n \cdot I$$

$$n \cdot I = g \frac{|\vec{B}|}{\mu_0} + \mu_0 \frac{|\vec{B}|}{\mu_0 \mu} \approx g \frac{|\vec{B}|}{\mu_0}$$

z.B. $B = 1 \text{ T}, g = 10 \text{ cm}$

$$\Rightarrow n \cdot I = \frac{0,1 \text{ m} \cdot 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{A} \cdot \text{m}}} \approx 80000 \text{ Amperewindungen}$$

z.B. 100 Windungen $\rightarrow 800 \text{ A}$

$\frac{\delta P}{P} = 10^{-4} \Rightarrow$ Strom auf 10^{-4} stabilisieren

NMR $\frac{\delta B}{B} \approx 10^{-4}$

1 MW Leistung \Rightarrow Kühlwasser stabilisieren

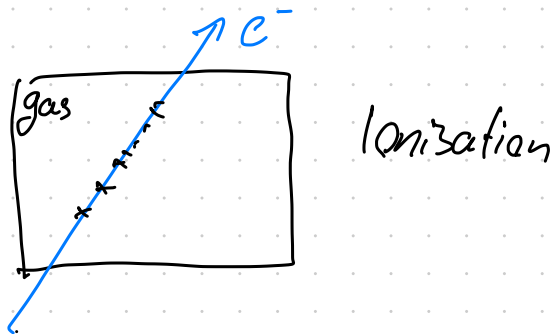
Fotalebene

$$\left. \begin{array}{l} \text{Auflösung: } \delta x < 0,1 \text{ mm} \\ \text{Akzeptanz: } \frac{\Delta p}{p} = 30\% \\ \text{Impulsauflösung: } \frac{\delta p}{p} = 10^{-4} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x = 0,1 \text{ mm} \approx 0,3 / 10^{-4} \\ \approx 300 \text{ mm} \\ A1: 2000 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \end{array}$$

große Fläche, hohe Auflösung, geringe Dichte

⇒ elektrische Signale

Gasdetektor:



⇒ wähle leicht ionisierbares Gas

⇒ monoatomare Gase, schwer ⇒ Edelgas ⇒ Argon

Dichte $\rho = 1,66 \text{ mg/cm}^3$

Energieverlust $\frac{dE}{dx} = 2,53 \frac{\text{keV}}{\text{cm}}$

Ionisationsenergie $E_I = 11,6 \text{ eV}$

primäre Ionisationsprozesse: $25 \frac{1}{\text{cm}}$

produzierte e^- / Ionenpaare: $97 \frac{1}{\text{cm}}$ zu wenig.

Gasverstärkung



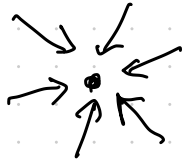
λ : mittlere freie Weglänge

$$|\vec{E}| \cdot \lambda > E_I$$

⇒ Lawineneffekt

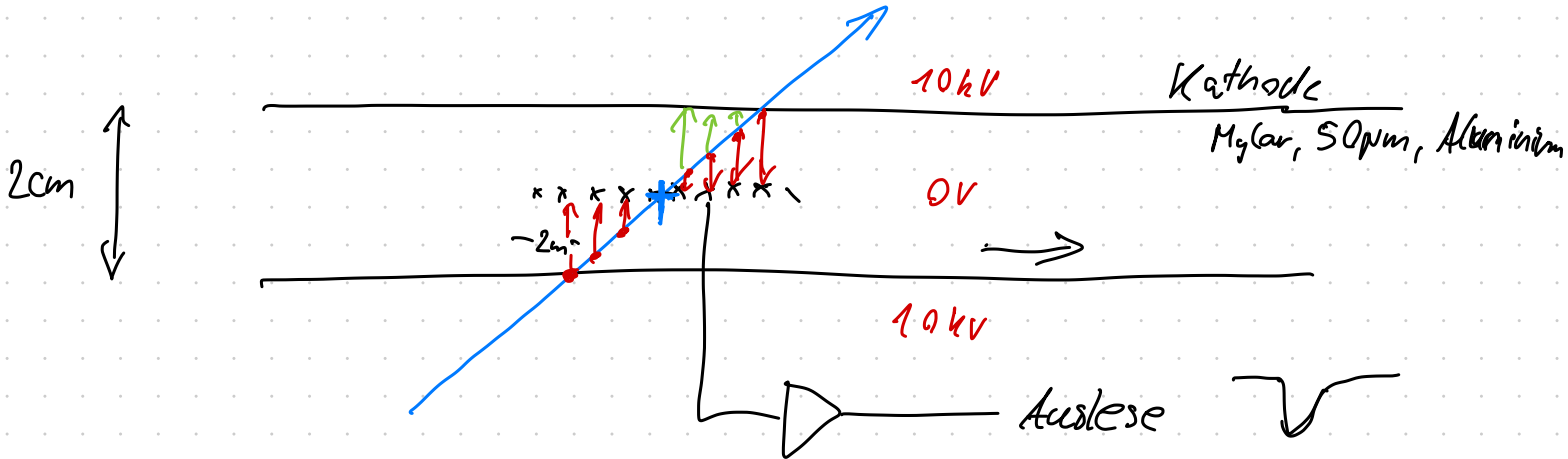
lokale hohe Feldstärke:

Draht $|\vec{E}| \sim \frac{1}{r}$



$r = 50 \mu\text{m}$

Gasverstärkung $A \sim 10^5 - 10^6$ üblich \Rightarrow klare Signale



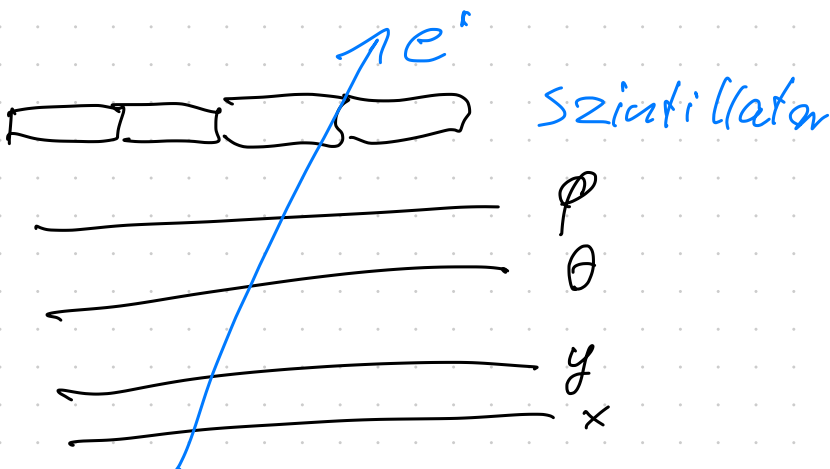
- Ionisation
- Drift der Elektronen $v \approx 10 \frac{\text{cm}}{\mu\text{s}}$
- Gasverstärkung

Messung der Zeit

Spurrekonstruktion \Rightarrow Durchtrittsort $\frac{\delta x}{x} \approx 70 \mu\text{m}$

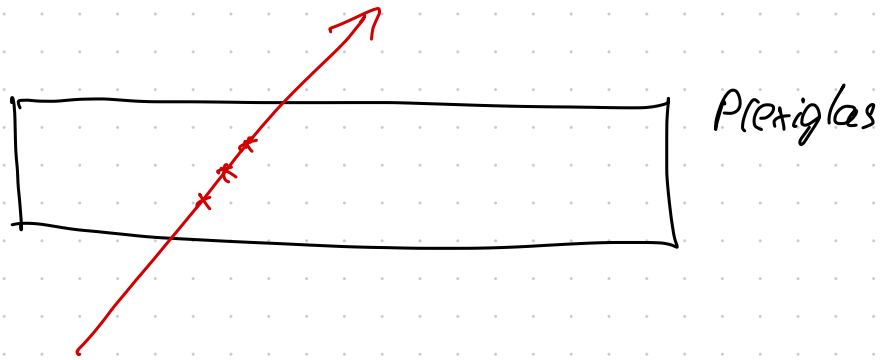
Winkel nicht genau genug

\Rightarrow 4 Lagen, gekreuzte Drähte $\Rightarrow x, y, \theta, \varphi$



Szintillator \Rightarrow Startzeitpunkt (Trigger) \Rightarrow Auslese

\Rightarrow Zeitmessung



- Ionisation
- Rekombination in angeregten Zustand
- Abregung unter Emission von Licht
- Absorption und Reemission mit niedriger Wellenlänge
"Wellenlängenschieber"

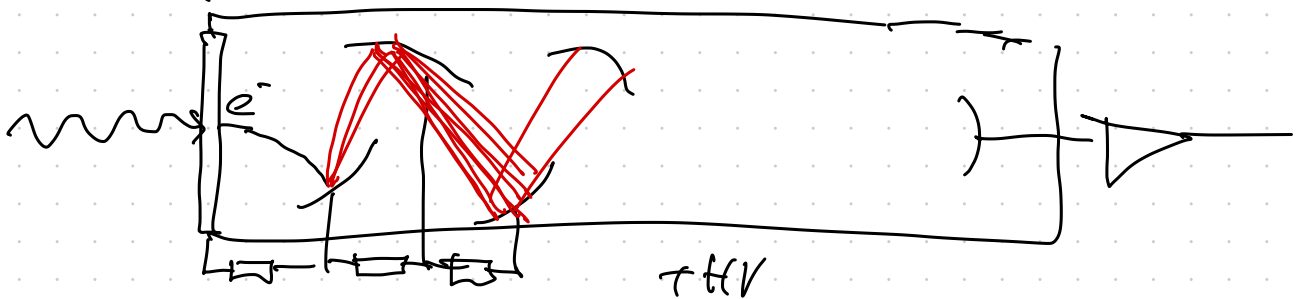
\Rightarrow sichtbares Licht

Typisch: 1 photon / 100 eV

\Rightarrow 1 cm, minimalionisierend $\Rightarrow 2 \cdot 10^4$ Photonen

Photomultiplier

Glas + Cs

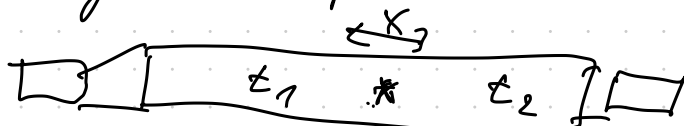


$\sim 3 \times$ pro Stufe

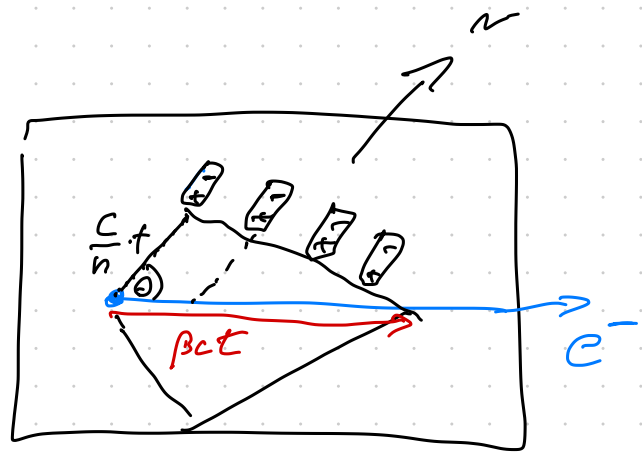
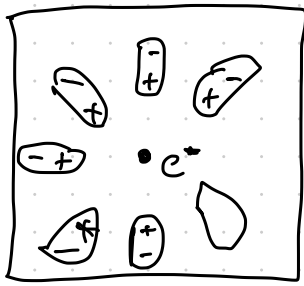
12 Stufen $\Rightarrow 10^6$ Elektronen/Photon

Zeitauflösung

100 ps



Cherenkov-Strahlung



Ausbreitung der Polarisation \rightarrow Lichtgeschwindigkeit im Medium $c' = \frac{c}{n}$

n : Brechungsindex

$$\cos \theta = \frac{\frac{c}{n} t}{\beta c t} = \frac{1}{n\beta}$$

\Rightarrow gerichtetes Licht θ

\Rightarrow Nachweischwelle $\beta > \frac{1}{n}$

$$\frac{d^2 N}{dE dx} \approx 370 \sin^2 \theta \frac{1}{eV \text{cm}}$$

\Rightarrow Photomultiplier

A1: Dehafluorbutan C_4F_{10}

$$n = 1.0013$$

\Rightarrow Schwelle e^- : 10 MeV

$$m_{\pi} = 130 \frac{\text{MeV}}{c^2} \quad \pi^-$$

$$\pi^- : 2700 \text{ MeV}$$